

### Các công thức thường dùng

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$$

$$\sin 2A = 2 \sin A \cos A$$

$$\cos 2A = 1 - 2 \sin^2 A = 2 \cos^2 A - 1$$

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$\sin A - \sin B = 2 \cos \frac{A+B}{2} \sin \frac{A-B}{2}$$

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$\cos A - \cos B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \sin \frac{B-A}{2}$$

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A-B) - \cos(A+B)]$$

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A-B) + \cos(A+B)]$$

$$\sin A \cos B = \frac{1}{2} [\sin(A-B) - \sin(A+B)]$$

$$\int \sin nx \, dx = -\frac{\cos nx}{n} \quad \int \cos nx \, dx = \frac{\sin nx}{n}$$

60

cuu duong than cong . com

### CÁC LINH KIỆN BÁN DẪN CÔNG SUẤT

cuu duong than cong . com

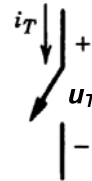
61

### Giới thiệu về bán dẫn công suất

Linh kiện bán dẫn điện tử công suất chỉ hoạt động ở hai chế độ: dẫn (ON) và tắt (OFF). Do đó, chúng còn được gọi là khoá bán dẫn (power switch).

Với khoá bán dẫn lý tưởng:

- Ở chế độ dẫn:  $u_T = 0 \rightarrow$  Tổn hao trên khoá bán dẫn  $p_T = u_T \cdot i_T = 0$ ,
- Ở chế độ tắt:  $i_T = 0 \rightarrow$  Tổn hao trên khoá bán dẫn  $p_T = u_T \cdot i_T = 0$ .



Những yêu cầu của một linh kiện bán dẫn điện tử công suất:

- Không có tổn hao khi dẫn
- Không có tổn hao khi tắt
- Không có tổn hao khi chuyển mạch (tắt  $\rightarrow$  dẫn hoặc dẫn  $\rightarrow$  tắt)
- Công suất điều khiển nhỏ
- Thời gian chuyển mạch (turn-on time, turn-off time) thấp
- Điện áp, dòng điện định mức phù hợp với ứng dụng
- Có thể dẫn dòng một chiều / hai chiều

62

cuu duong than cong . com

### Giới thiệu về bán dẫn công suất

Phân loại linh kiện bán dẫn theo khả năng điều khiển:

- Linh kiện không điều khiển: quá trình chỉ chuyển mạch phụ thuộc nguồn cung cấp, ví dụ: diode, diac...
- Linh kiện chỉ kích dẫn được, không có khả năng kích tắt, ví dụ: SCR, triac.
- Linh kiện có khả năng kích dẫn và kích tắt (Self-commutated device), ví dụ: transistor, GTO (Gate Turn-off Thyristor), IGCT...

Những thông số quan trọng của linh kiện bán dẫn ĐTCS:

- Điện áp đánh thủng (breakdown voltage) cao
- Điện trở dẫn (ON resistance) thấp
- Thời gian chuyển mạch thấp

Tuy nhiên, các thông số trên có ảnh hưởng đến nhau khi chế tạo linh kiện, không thể cải tiến thông số này mà không gây ảnh hưởng lên thông số khác.

63

## Giới thiệu về bán dẫn công suất

Các linh kiện làm việc trên nguyên lý hạt tải đa số (majority carrier) như MOSFET, Schottky diode có điện áp đánh thủng không cao để điện trở dẫn ở mức chấp nhận được, đổi lại, linh kiện có thời gian chuyển mạch thấp.

Các linh kiện làm việc trên nguyên lý hạt tải thiểu số (minority carrier) như transistor, SCR, GTO, v.v... có điện trở dẫn thấp và có thể chế tạo với điện áp đánh thủng cao. Tuy nhiên, chúng cần thời gian chuyển mạch lớn hơn nhiều so với linh kiện làm việc theo nguyên lý hạt tải đa số nói trên, vì cần thời gian để bơm hoặc rút các hạt tải thiểu số vào vùng không hạt tải (depletion layer) tương ứng với việc điều khiển dẫn hoặc tắt linh kiện.

64

cuu duong than cong . com

## Diode

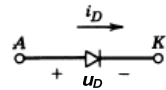
### Diode công suất:

- Loại lưỡng cực (mối nối p-n): dùng cho bộ biến đổi công suất cao, có thể chế tạo với điện áp và dòng làm việc lớn. Dòng định mức từ 1A lên tới hơn 5000A, điện áp định mức từ 10V lên đến 10kV hoặc hơn nữa.
- Loại Schottky diode: tần số hoạt động cao, điện áp bão hoà thấp ( $0.3V \rightarrow 0.5V$ ), tuy nhiên chỉ có thể chế tạo với điện áp làm việc thấp.
- Sử dụng trong các mạch chỉnh lưu và mạch biến đổi dc-dc.

65

cuu duong than cong . com

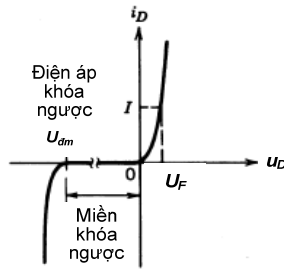
## Diode



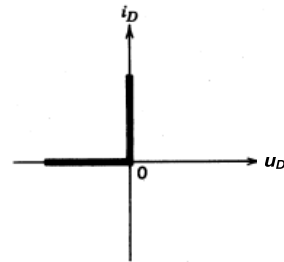
a. Ký hiệu



b. Cấu tạo



c. Đặc tuyến



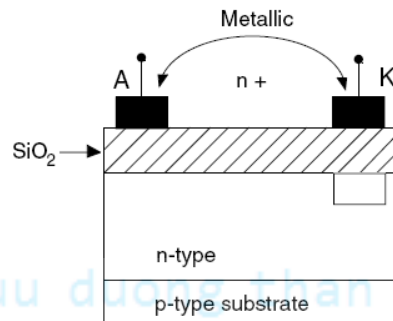
d. Đặc tuyến lý tưởng

## Diode lưỡng cực

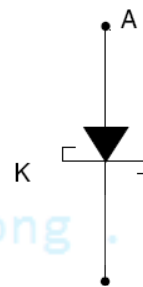
66

cuu duong than cong . com

## Diode



a. Cấu trúc



b. Ký hiệu

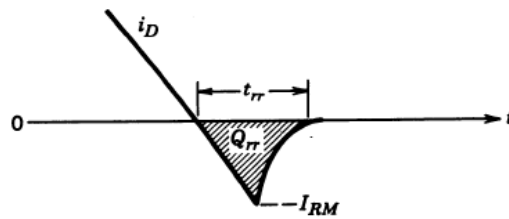
## Diode Schottky

67

cuu duong than cong . com

## Diode

$t_{rr}$ : thời gian phục hồi tính chất khoá của diode. Dòng qua diode trong thời gian này là dòng chuyển mạch (hoặc dòng phục hồi của diode).

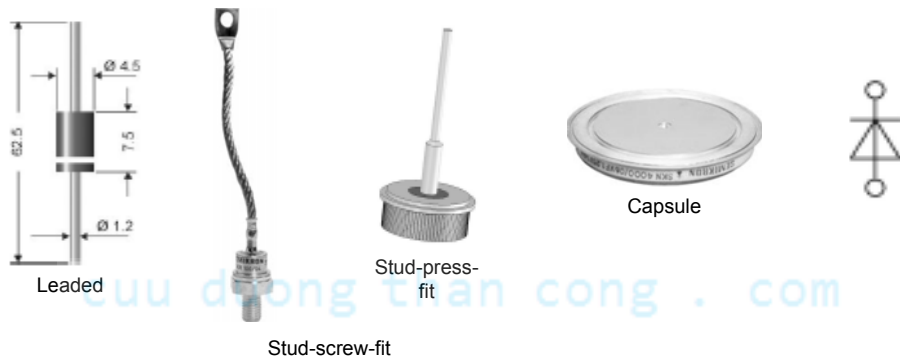


Đặc tính chuyển mạch của diode

68

cuu duong than cong . com

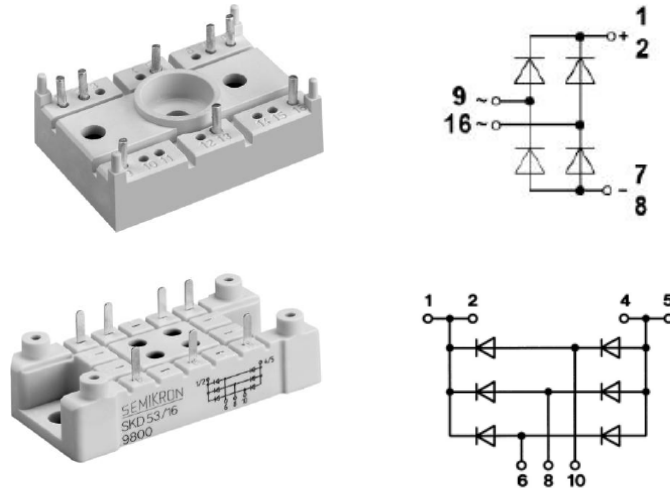
## Diode



Các dạng diode thực tế

69

## Diode



Cầu chỉnh lưu diode

70

cuu duong than cong . com

## SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Ứng dụng:

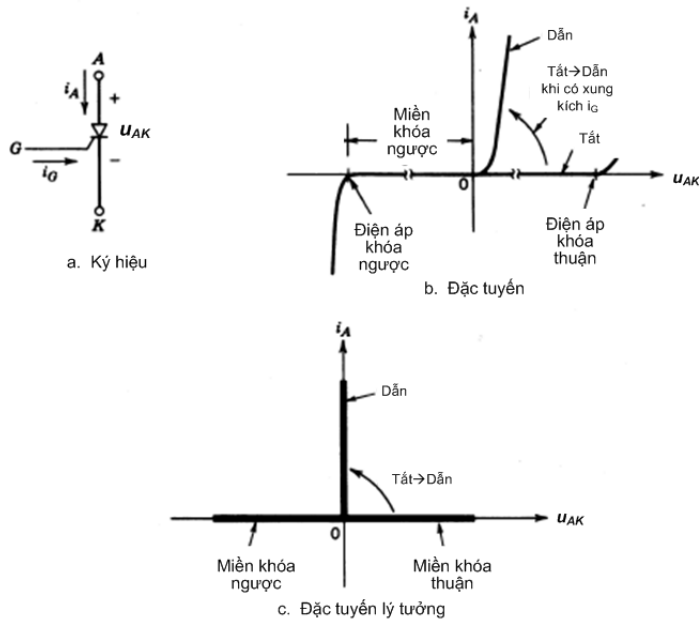
- Điều khiển pha ( $AC \rightarrow DC$ ,  $AC \rightarrow AC$ )
- Nghịch lưu ( $DC \rightarrow AC$ )
- Contact bán dẫn (Static switch)

Đặc tính:

- Dẫn như một diode khi được phân cực thuận và có xung kích đưa vào cực Gate. Tắt khi bị phân cực ngược hoặc dòng giảm xuống đến zero.
- Điện áp  $U_{AK}$  khi SCR dẫn khoảng 1-2 Volts
- Kích dẫn bằng xung dòng vào cực Gate (cỡ vài mA đến vài trăm mA)
- Thời gian tắt từ vài  $\mu s$  đến 200  $\mu s$ .
- Được chế tạo với dòng định mức từ 10A tới 5000A, và điện áp định mức từ 200V tới 6kV hoặc cao hơn.

71

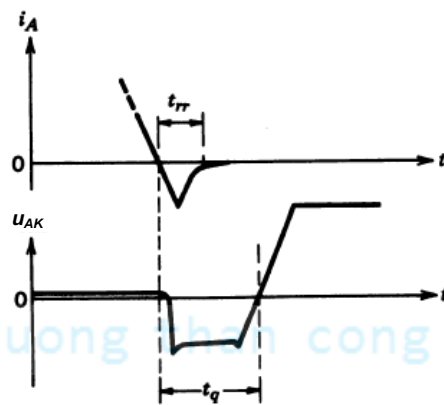
## SCR (Silicon Controlled Rectifier)



72

cuu duong than cong . com

## SCR (Silicon Controlled Rectifier)



Đặc tính của SCR khi tắt

Lưu ý: áp ngược cần duy trì trong khoảng thời gian  $> t_q$  để đảm bảo SCR hồi phục tính chất khoá

73

### SCR (Silicon Controlled Rectifier)

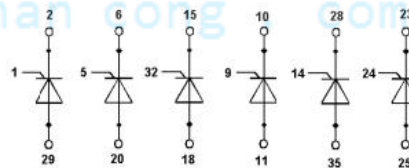
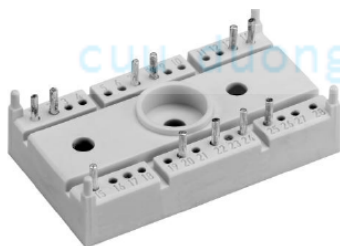
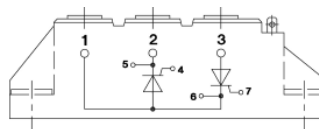


Các dạng thyristor thực tế

74

cuu duong than cong . com

### SCR (Silicon Controlled Rectifier)

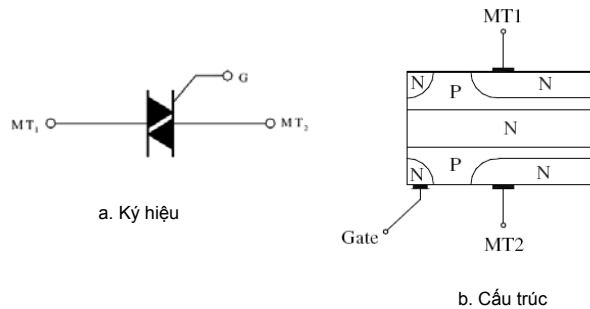


Các dạng thyristor thực tế

75



## Triac

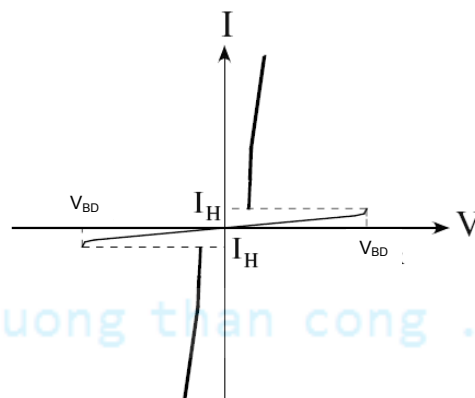


- Triac là linh kiện bán dẫn công suất 3 cực, có cấu trúc giống như hai SCR mắc song song ngược nhưng được điều khiển bởi một cực Gate. Xung kích đưa vào cực gate có thể âm hoặc dương.
- Chế tạo với dòng định mức từ 2A đến 50A và áp định mức từ 200V đến 800V.
- Được sử dụng nhiều trong các mạch điều khiển điện áp xoay chiều một pha cỡ nhỏ cho các ứng dụng như điều khiển độ sáng đèn (light dimmer), điều khiển công suất cho các dụng cụ cầm tay hoặc thiết bị gia dụng.

76

cuu duong than cong . com

## Triac



cuu duong than cong . com

Đặc tính Volt-Ampere của Triac

77

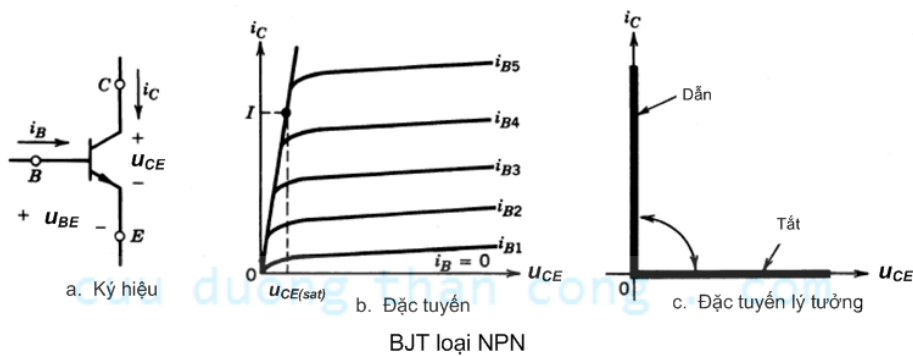
## BJT (Bipolar Junction Transistor)

- Dẫn dòng collector (theo một chiều) và ở trạng thái bão hòa khi cung cấp đủ dòng vào cực Base:  $I_C \leq \beta I_B$ . Lưu ý là  $\beta < 10$  với BJT công suất lớn.
- Điều khiển bằng dòng vào cực B ( $I_B$ )  $\rightarrow$  cần công suất điều khiển lớn.
- Được chế tạo với dòng định mức từ 0.5A đến 500A (hoặc cao hơn) và điện áp từ 30 đến 1200V. Lưu ý: transistor thường không thể chịu đựng điện áp ngược lớn hơn khoảng vài chục Volts, nên không được phân cực ngược transistor.
- Điện áp bão hòa ( $U_{CE,sat}$ ) cỡ 0.5-2.5 Volts. Transistor Darlington có  $U_{CE,sat}$  lớn hơn transistor đơn có cùng công suất  $\rightarrow$  tổn hao nhiều hơn.
- Thời gian tắt ( $t_{off}$ ) từ 0.5  $\mu s$  đến 100 $\mu s$ .
- Ứng dụng trong các bộ biến đổi dc-dc hoặc dc-ac. Tuy nhiên, BJT hiện được thay thế bởi MOSFET (trong ứng dụng công suất thấp) và IGBT (trong ứng dụng công suất cao).

78

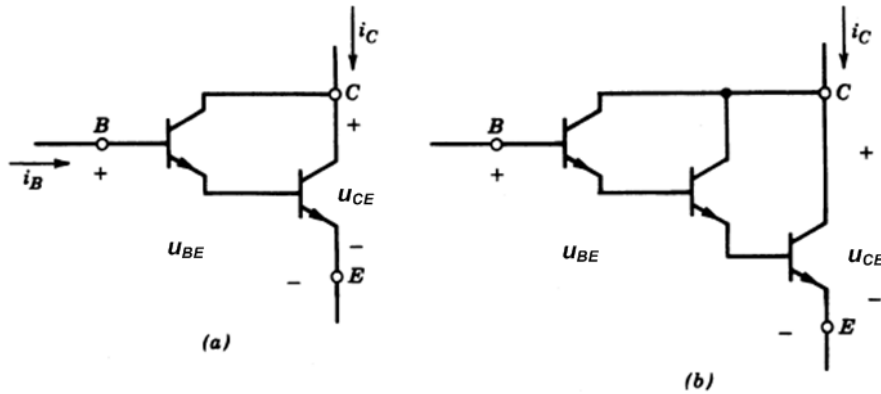
cuu duong than cong . com

## BJT (Bipolar Junction Transistor)



79

## BJT (Bipolar Junction Transistor)



Transistor ghép Darlington

80

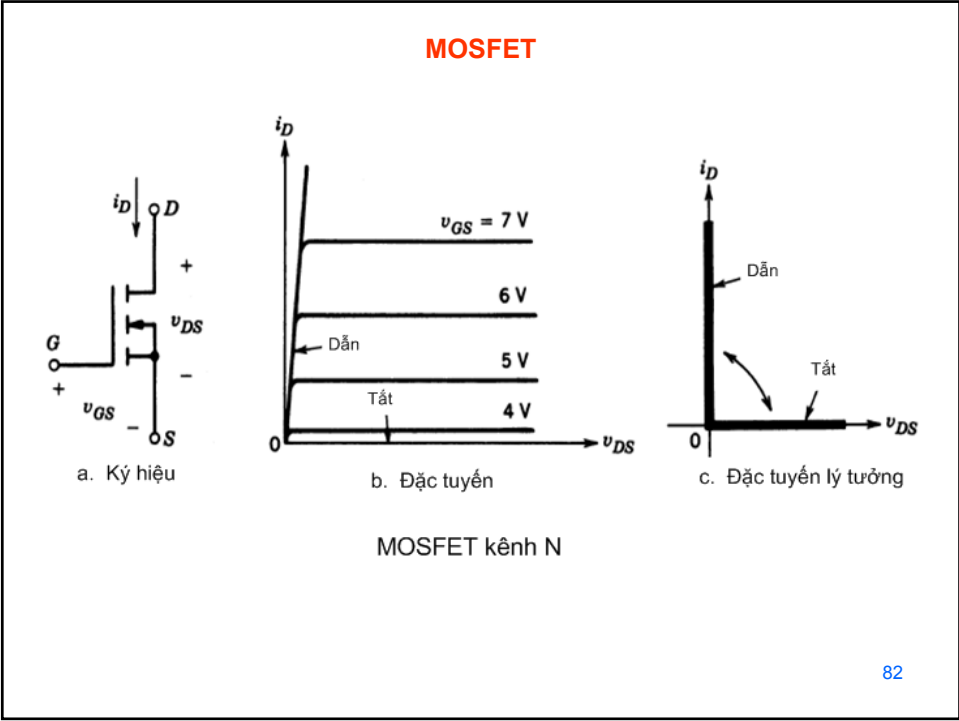
cuu duong than cong . com

## MOSFET

- Điều khiển bằng điện áp  $V_{GS}$ : dòng vào rất bé  $\rightarrow$  Công suất điều khiển thấp. Thông thường, điện áp điều khiển cần thiết để MOSFET dẫn:  $U_{GS(ON)}$  cỡ 5  $\rightarrow$  20V.
- Chế tạo với dòng định mức trong khoảng 0.5 đến 200A và điện áp từ 20V đến 1000V.
- Có thể đóng cắt rất nhanh do thời gian chuyển mạch thấp:  $t_{off} \approx 50ns - 200ns$ . Do đó, MOSFET được sử dụng trong những ứng dụng hoạt động với điện áp thấp (vài chục  $\rightarrow$  vài trăm Volts), tần số cao.
- Có thể nối song song các MOSFET để tăng công suất của mạch.
- Thường sử dụng trong các bộ biến đổi dc-dc hoặc dc-ac.

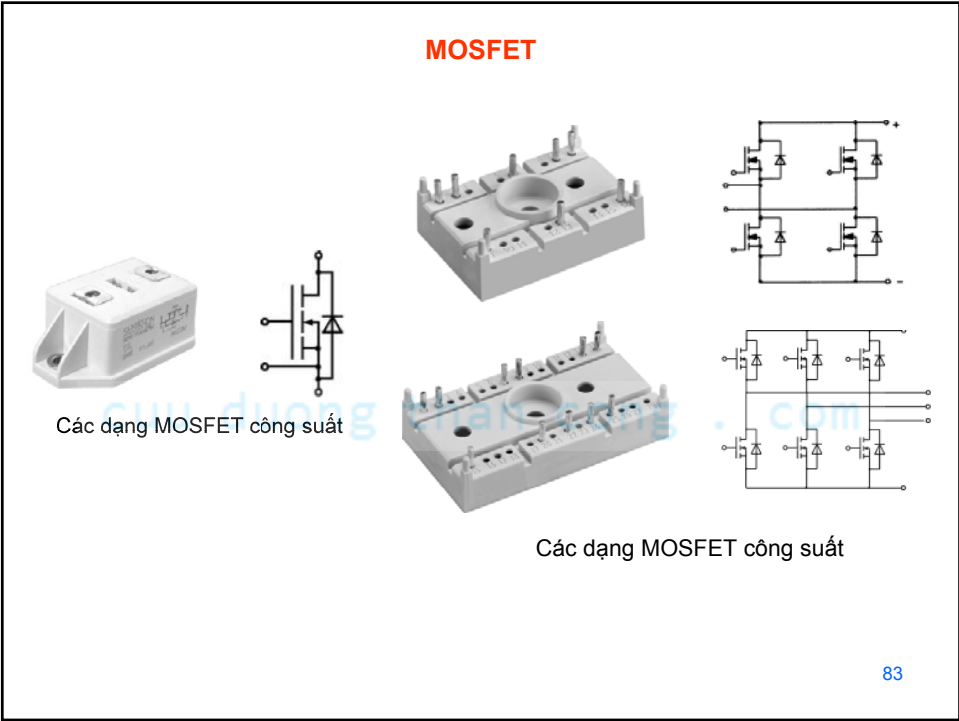
cuu duong than cong . com

81



82

cuu duong than cong . com



83

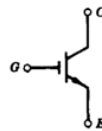
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- Có thể xem là sự kết hợp giữa MOSFET và BJT, điều khiển ON/OFF bằng cách đưa điện áp vào cực G và E ( $U_{GE}$ ).
- Điện áp giữa C-E khi IGBT dẫn bão hoà:  $U_{CE, sat} \approx 2-3V$
- Thời gian tắt:  $t_{off}$  cỡ vài trăm ns  $\rightarrow 1\mu s$
- Hiện được chế tạo với công suất lên đến 6.5kV, 700A. IGBT với điện áp lên đến 10kV có thể ra mắt trong tương lai gần (đang thử nghiệm).

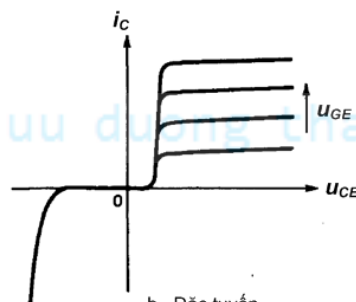
84

cuu duong than cong . com

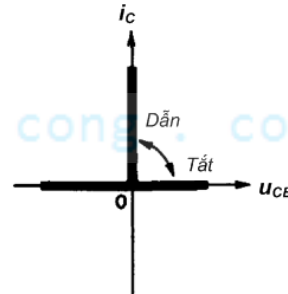
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



a. Ký hiệu



b. Đặc tuyến

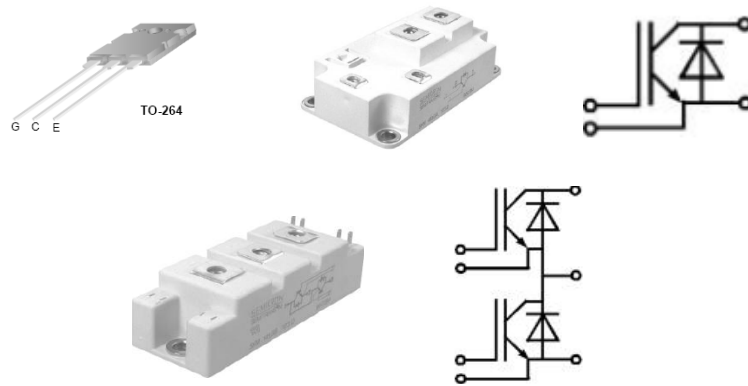


c. Đặc tuyến lý tưởng

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

85

## IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

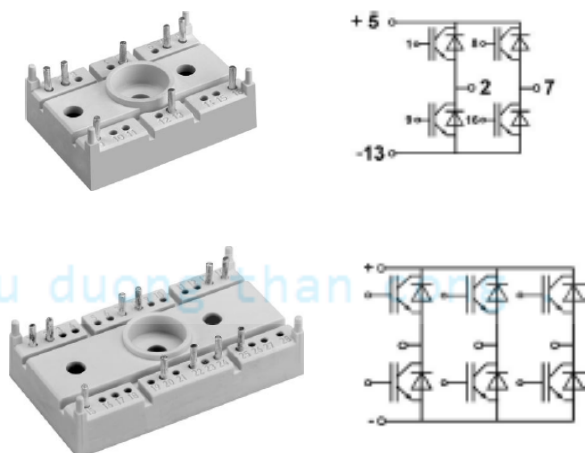


Các dạng IGBT công suất

86

cuu duong than cong . com

## IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

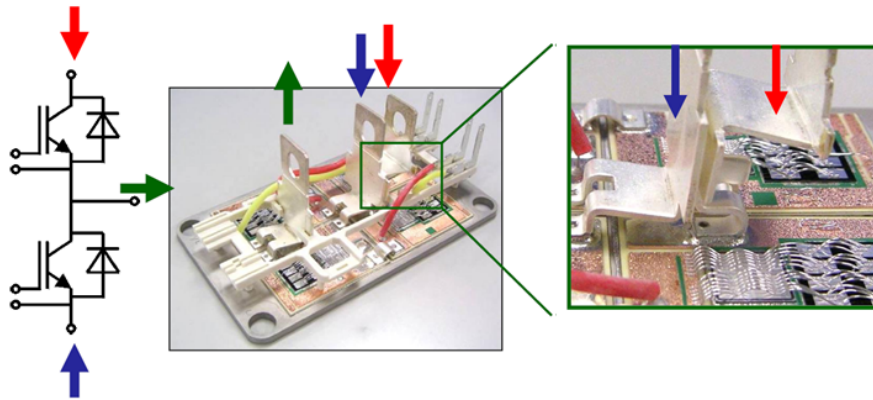


Các dạng IGBT công suất

87

cuu duong than cong . com

### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



Cấu trúc thực tế bên trong một module IGBT

88

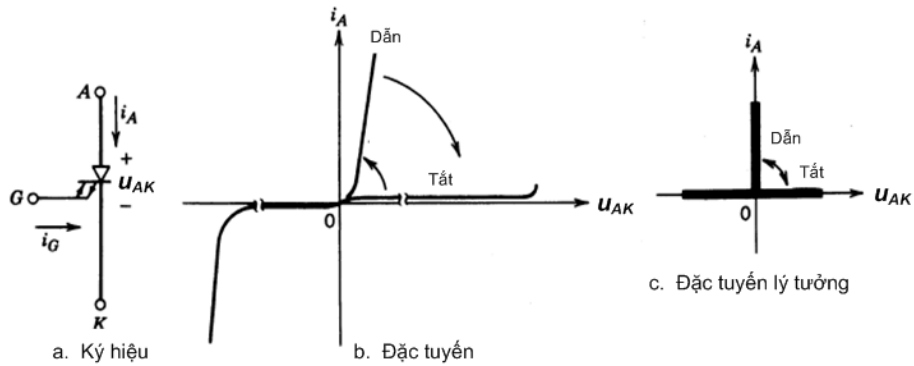
cuu duong than cong . com

### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

- Điều khiển ON hoặc OFF bằng cách đưa xung dòng vào cực G,
- Giống như thyristor, GTO được kích dẫn bằng cách đưa một xung dòng dương vào cực G, và sau khi ở trạng thái dẫn, GTO có thể duy trì trạng thái này mà không cần dòng kích vào cực G nữa.
- Khác với thyristor, GTO có thể kích tắt bằng cách đưa xung dòng âm đủ lớn vào cực G (bằng cách đặt  $U_{GK} < 0$ ). Xung dòng này chỉ cần duy trì trong khoảng thời gian cần thiết để tắt GTO ( $t_q$ ), tuy nhiên, dòng này cần có giá trị cỡ 1/3 dòng  $I_A$  qua GTO trước khi tắt.
- Có thể chế tạo với công suất lớn nhất khoảng 6kV, 6kA, tốc độ chuyển mạch tương tự như SCR. Do đó, GTO được dùng trong những ứng dụng với dòng và áp cao. Tần số đóng cắt có thể từ vài trăm Hz đến 10kHz.
- Trong các ứng dụng của GTO, tải thường mang tính cảm kháng  $\rightarrow$  điện áp đặt lên GTO khá lớn do  $dv/dt$  trên cảm kháng tải gây ra  $\rightarrow$  cần có mạch snubber cho GTO.

89

### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

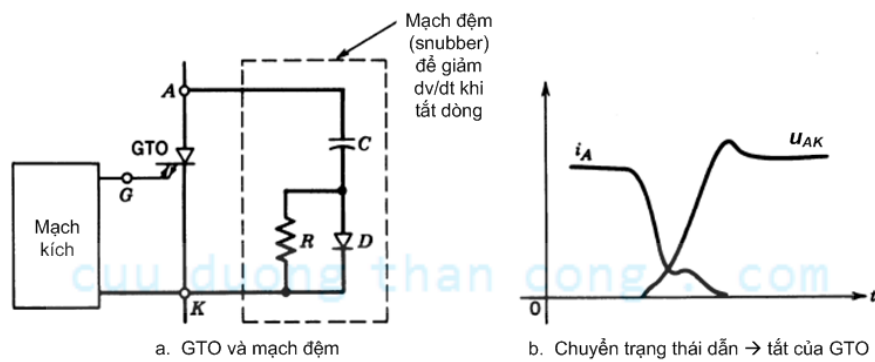


GTO (Gate-Turn Off Thyristor)

90

cuu duong than cong . com

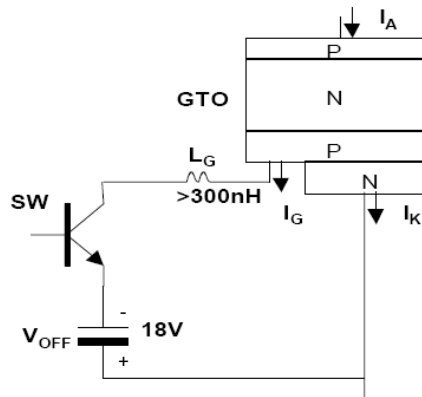
### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)



91



### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)



GTO thực tế với dây dẫn để đưa xung kích vào cực G - K

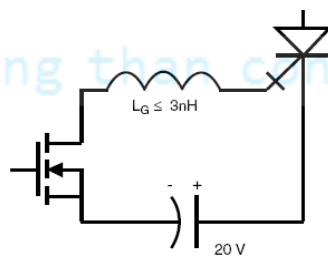
GTO với mạch kích tắt điển hình

92

cuu duong than cong . com

### IGCT / GCT

- Sự cải tiến công nghệ GTO đưa đến phát minh các linh kiện mới trong đó tích hợp mạch tắt với FET (Field Effect Transistor) vào cực Gate của linh kiện nhằm làm tăng tốc độ đóng cắt và giảm công suất điều khiển. Do đó, các linh kiện này chuyển mạch nhanh hơn và dễ sử dụng hơn GTO truyền thống.
- GCT (Gate Controlled Thyristor – phát triển bởi Mitsubishi) và IGCT (Integrated Gate Controlled Thyristor - phát triển bởi ABB).
- Hiện được chế tạo với công suất lên đến 6.5kV, 4kA.



Mạch tương đương của IGCT / GCT

93

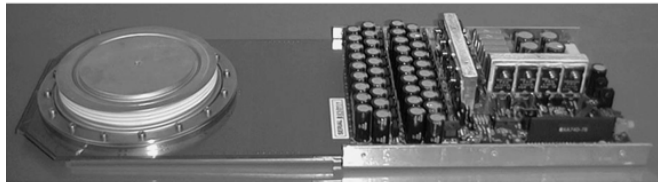
cuu duong than cong . com

## IGCT / GCT

GCT

LG<3

Driver



Mitsubishi 4kA / 4.5 kV GCT

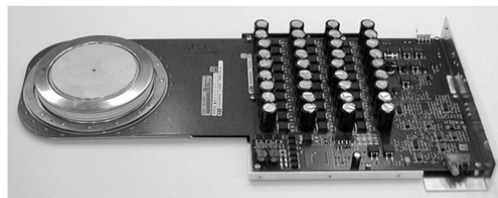
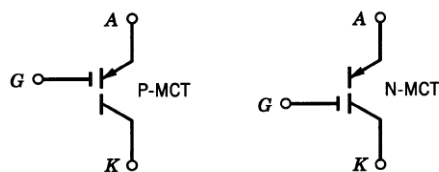


ABB 4 kA / 4.5 kV IGCT

94

cuu duong than cong . com

## MCT (MOS-Controlled Thyristor)



Kích dẫn **MCT kênh p**: đưa xung **âm** vào cực G-A

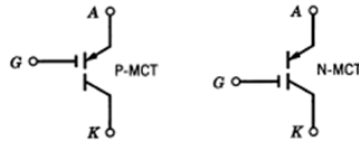
Kích dẫn **MCT kênh n**: đưa xung **dương** vào cực G-K

Kích tắt **MCT kênh p**: đưa xung **dương** vào cực G-A

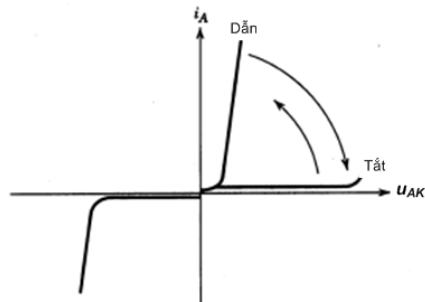
Kích tắt **MCT kênh n**: đưa xung **âm** vào cực G-K

95

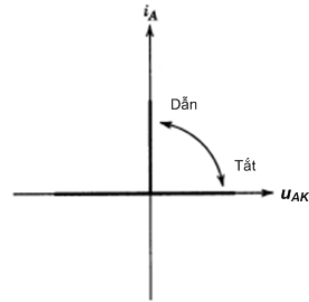
### MCT (MOS-Controlled Thyristor)



a. Ký hiệu



b. Đặc tuyến



c. Đặc tuyến lý tưởng

96

cuu duong than cong . com

### MCT (MOS-Controlled Thyristor)

- So với GTO, MCT đóng ngắt đơn giản hơn và với công suất thấp hơn, ngoài ra tốc độ đóng cắt của MCT nhanh hơn so với GTO (thời gian  $t_{on}$  và  $t_{off}$  chỉ cỡ vài  $\mu s$ )
- MCT có điện áp  $U_{AK(ON)}$  nhỏ hơn điện áp  $U_{CE,sat}$  của IGBT.
- Hiện có thể chế tạo với điện áp cỡ 1500V, dòng điện từ 50A đến vài trăm A. Trong tương lai gần, linh kiện với điện áp lên đến 3000V đang được chế tạo. Tuy nhiên, MCT khó có thể chế tạo với dòng lớn như GTO vì do cấu trúc khá phức tạp, nên không thể chế tạo với tiết diện bán dẫn lớn như GTO.

cuu duong than cong . com

97

### Khả năng đóng ngắt của các khóa bán dẫn thông dụng

<i>Loại linh kiện</i>	<i>Công suất đóng ngắt</i>	<i>Tần số đóng ngắt</i>
BJT	Trung bình	Trung bình
MOSFET	Thấp	Cao
GTO	Cao	Thấp
IGBT	Trung bình	Trung bình
MCT	Trung bình	Trung bình

98

cuu duong than cong . com

### Sự phát triển của các chất bán dẫn mới

Hiện nay, Silicon là chất bán dẫn chủ yếu để chế tạo linh kiện điện tử công suất. Tuy nhiên, các loại chất bán dẫn mới như SiC hoặc kim cương (tổng hợp dưới dạng màng mỏng) đang được nghiên cứu ứng dụng.

Linh kiện với bán dẫn Silicon có thể chịu nhiệt tối đa lên tới 175°C (nhiệt độ mối nối bán dẫn – junction temperature), trong khi với SiC và kim cương, nhiệt độ này lần lượt là 350°C và 600°C. Điều này giúp làm giảm đáng kể kích thước linh kiện và yêu cầu tản nhiệt.

Hiện nay, một số linh kiện sử dụng bán dẫn SiC đã (hoặc sẽ) có mặt trên thị trường:

1. Schottky diode: 300-700V, 2-10A
2. Hybrid JFET (1.5kV, 12A)
3. BJT (1-10kV)
4. GTO (8-40kV)
5. MOSFET (0.2 – 6kV)

99